油蒿与沙柳灌木地藓结皮发育差异研究

莫秋霞[1]， 宋 炜[2]， 卜崇峰[3,4]， 王 春[3]， 王鹤鸣[5]， 李亚红[6]

（1. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 杨凌 712100；2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司景观与工程分院，四川 成都 610041；3. 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；4. 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；5. 西北农林科技大学水利与建筑学院，陕西 杨凌 712100；6. 眉县县委办公室，陕西 宝鸡 722399）

摘 要：针对毛乌素沙地油蒿灌木地的藓结皮发育总是明显优于沙柳灌木地的现象，基于两类灌木地的土壤性状、藓结皮发育指标的观测分析，结合两类灌木不同器官浸提液对藓结皮发育的化感试验，揭示造成两类灌木地中藓结皮发育差异巨大的原因。结果显示：（1）两类灌木地藓结皮的盖度存在显著差异($P<0.05$)，灌木地藓结皮的总盖度及冠层下、冠层间盖度均表现为：油蒿>沙柳，且油蒿灌木地的藓结皮总盖度及冠层下、冠层间的藓结皮盖度分别为沙柳灌木地相应藓结皮盖度的1.6倍、2.9倍和1.1倍；（2）Pearson相关分析显示，冠层下藓结皮盖度与土壤含水率显著正相关、厚度与粉粒含量显著正相关；冠层间藓结皮盖度与土壤含水率、黏粒含量显著正相关($P<0.05$)。油蒿灌木地较高的土壤含水率和黏粒、粉粒含量明显促进了藓结皮的发育；（3）化感试验表明，油蒿、沙柳的根、茎、叶水浸提液均抑制了藓结皮的发育，即化感综合效应(SE)均为负值。其中，0.2 $g\cdot mL^{-1}$沙柳叶水浸提液的化感抑制作用最强，SE为−0.95，抑制作用显著高于油蒿叶(SE为−0.65)($P<0.05$)。表明油蒿灌木地较高的土壤含水率、黏粒和粉粒含量，以及沙柳叶对藓结皮显著的化感抑制作用，共同导致油蒿灌木地藓结皮的发育状况优于沙柳地。

关键词：油蒿；沙柳；藓结皮；化感作用；差异研究；毛乌素沙地

生物结皮是由藻类、地衣、苔藓以及微生物与土壤颗粒胶结形成的复合体，广泛分布于干旱半干旱区[1]，覆盖了地球陆地表面积的12%[2]。由于生物结皮在促进养分循环[3-4]，稳定地表[5]，抵抗风蚀、水蚀[6-7]，调节地表径流和降雨入渗[8-9]等方面发挥着重要作用，其发育状况常被作为生态系统稳定性和退化生态系统恢复状况评价的重要指标之一[10]。近年来，国内外学者针对生物结皮发育及分布影响因素开展了大量研究工作。在全球尺度上，气候是影响生物结皮发育分布的关键因子[11-12]。例如，在以色列内盖夫沙漠，结皮群落沿降雨梯度变化，从干燥(年降雨量<100 mm)地区的蓝藻结皮为主，到湿润(年降雨量达200 mm)地区的蓝藻、地衣和苔藓混合地[13]。在区域尺度上，则与地形、土壤性质、植被和干扰等因素密切相关[14-16]。目前，有关植被对结皮的影响探讨，主要集中在植被盖度、冠层、凋落物对生物结皮发育影响等方面[14, 17-18]。例如，Zhou等[14]研究发现，相比于冠层间，藓结皮在阴凉潮湿的冠层下发育更好。但生物结皮与植被之间的关系极为复杂，且不同类型植被对生物结皮生长发育的影响研究较少。揭示植被-结皮系统中影响藓结皮发育的因素，对深入理解毛乌素沙地藓结皮层的形成、维持沙漠生态系统功能及荒漠化防治具有重要意义。

毛乌素沙地作为中国四大沙地之一，地处森林-草原-荒漠的“生态应力带”上，是中国北方的重要生态屏障[19]。生物结皮是毛乌素沙地重要的生物组分，与油蒿、沙柳等高等植物共同覆盖于地表，影响着毛乌素沙地的生态过程[20]。笔者调查发现，油蒿灌木地的藓结皮发育好、盖度高，常以油蒿植株为中心呈片状或斑块状分布在其冠层下及冠层间，而与之相邻且生境相似的沙柳灌木地，往往没

收稿日期：2022-11-17； **修订日期：**2023-02-27
基金项目：国家自然科学基金面上项目（41971131）；鹏程尚学教育金（S5030022001）
作者简介：莫秋霞（1997-），女，硕士研究生，主要从事生态修复研究. E-mail: moqiuxia2022@126.com
通讯作者：卜崇峰. E-mail: buchongfeng@163.com

有或者少有藓结皮。为探寻影响藓结皮发育差异的原因，本研究测定了两类灌木地的土壤性状、藓结皮发育指标，开展了两类灌木不同器官浸提液对藓结皮的化感试验，试图从土壤性状及植物化感作用两个方面阐明不同类型灌木影响下生物结皮的发育机制。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于陕西省榆林市横山区(37°21′~38°14′N，108°56′~110°01′E)(图1a)，毛乌素沙地南缘，鄂尔多斯草原向黄土高原过渡地带。属温带半干旱大陆性季风气候，四季分明，春季气温日差较大，寒潮霜冻时有发生，并多有大风，间有沙尘暴；夏季炎热，雨量相对增多，多有暴雨出现；秋季多雨，降温快，早霜冻频繁；冬季严寒而少雪。多年平均气温8.9 ℃，无霜期年平均175 d，年平均降水量352.2 mm，降雨集中在每年6—9月；研究区植被以油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)等为主，藓结皮主要优势种为银叶真藓(*Bryum argenteum* Hedw.)，伴生有橙色真藓(*Bryum rutilans* Brid.)、净口藓(*Gymnostomum calcareum* Nees & Hornsch.)等。

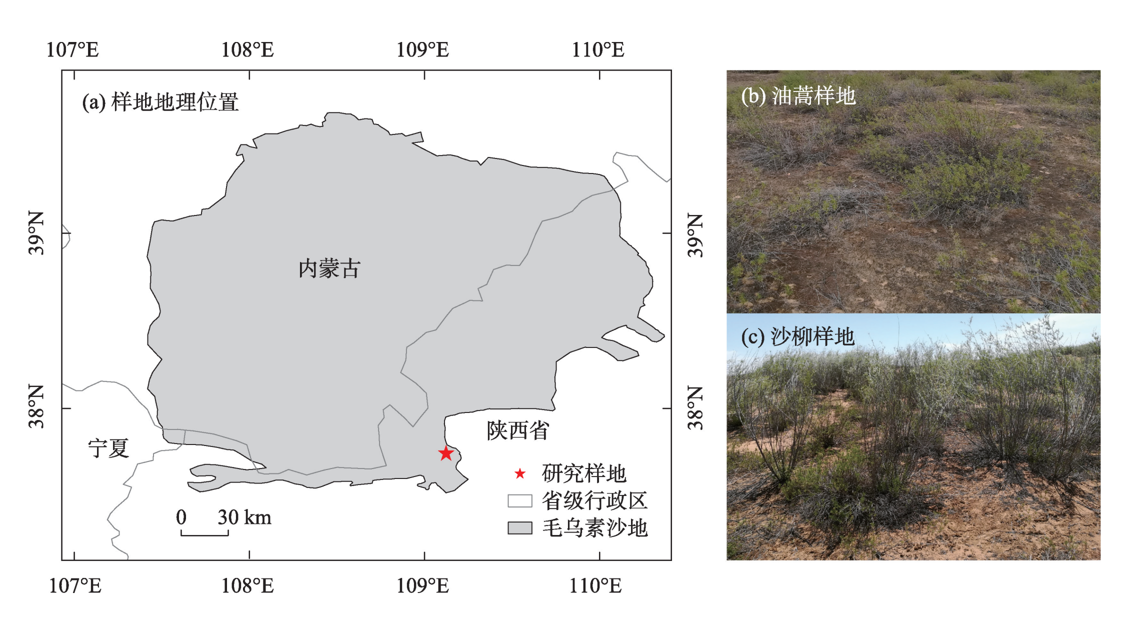
1.2　样地布设与样品采集

选择无放牧干扰、地势起伏较小的油蒿、沙柳灌木地作为试验样地。每类灌木样地随机布设3个大小为5 m×5 m的调查样方，在每个样方内的灌木冠层下方及冠层间不同角度分别随机布设3个大小为20 cm×20 cm的藓结皮调查样点。于2020年6月、8月、10月分别测定两类灌木冠层下、冠层间的藓结皮厚度、盖度及藓结皮下伏0~5 cm土壤养分(全氮、全磷、有机质)、含水率、pH、粒径组成等指标，土壤样品采样时间为9:00—10:00间，采样保证在采样前至少2 d没有发生降雨事件后进行。样地实景如图1b和图1c所示，样地基本信息状况及土壤性状背景值如表1、表2所示。

1.3　化感作用试验

1.3.1　*浸提液的制备*　将从试验样地采集的油蒿、沙柳低温避光运回实验室后，用蒸馏水洗净并用滤纸擦干。分别称取油蒿、沙柳的根、茎、叶各200 g，剪碎后放入广口瓶中，加入1000 mL蒸馏水，在室温20~24 ℃条件下浸提48 h(每隔12 h摇动5 min)，2层纱布和2层滤纸过滤，制得0.20 g·mL^{-1}的母液。将部分母液用蒸馏水稀释到0.02 g·mL^{-1}，与0.20 g·mL^{-1}的浸提母液一同保存于4 ℃低温环境备用。浸提液出现絮状沉淀，则停止使用，并重新配置。

1.3.2　*藓结皮化感试验*　化感试验在西北农林科技大学水土保持研究所人工气候室(RGL-P1000-C4)恒环境条件下进行(光照：6000 lx，光周期12 h/12 h，温度：15 ℃，空气湿度：75%)。试验所用土壤基质及藓结皮均采自试验样地，土壤基质为藓结皮下伏0~



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2020)4619，对底图边界无修改。

图1　样地地理位置及实景图

Fig. 1　Geographical location and real scene map of sample plot

表1　样地基本状况

Tab. 1　Basic conditions of sample plots

灌木类型	植被盖度/%	株高/cm
油蒿	35.00±2.08a	59.00±1.86a
沙柳	45.00±3.79a	223.00±6.17a

注：同列不同字母表示不同灌木地之间存在显著差异(P<0.05)。下同。

5 cm的沙土土壤，藓结皮选择发育良好、较为完整、盖度在90%以上且长势基本一致的藓结皮采集，藓结皮带回实验室晾干后粉碎备用。按照700 g·m^{-2}的接种量将粉碎的藓结皮撒播到经高温灭菌的土壤基质上(培养盒规格：9 cm×9 cm×4 cm)，用平整的小木板轻压使其与基质充分接触[21]。培育期间每隔2 d用移液枪向培育盒中施加20 mL不同器官、不同浓度的水浸提液，以等量蒸馏水为对照，共13个处理，每个处理设3个重复，具体因素及处理水平如表3所示。自藓结皮变绿后开始测定苔藓植株的株密度、株高度及盖度等指标，指标连续6 d无明显变化时则视为培育结束，不同处理间培育时间相同，培育时长为24 d。

采用化感指数(RI)衡量化感作用类型及强度[22]。公式如下：

$$RI=\begin{cases}1-CK/T(T\geqslant CK)\\T/CK-1(T<CK)\end{cases}$$

式中：CK为对照处理值；T为试验处理值。当RI > 0时表示促进作用，当RI < 0时表示抑制作用。化感综合效应指数(SE)是指供体对同一种受体植物各项测试指标化感指数(RI)的算数平均数[23]。

1.4　试验指标测定

苔藓指标：采用点样框法测量藓结皮盖度，网格焦点下有苔藓则记为1，无则记为0；游标卡尺测量藓结皮厚度、高度。

土壤指标：土壤全氮采用凯氏定氮法测定；土壤全磷采用硫酸-高氯酸消解-钼锑抗比色法(UV-2450)测定；土壤有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定；土壤含水率用烘干法测定；土壤pH值采用DELTA320 pH计进行测定；土壤颗粒组成采用Mastersizer 2000激光粒度仪进行测定[24]，其中颗粒分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、细砂(0.02~0.2 mm)、粗砂(0.2~2 mm)4种。

1.5　试验数据处理

数据采用R 4.1.2和IBM SPSS Statistics 23软件分析。采用独立样本T检验方法分别分析两类灌木地植被盖度、植被株高、土壤性状及藓结皮盖度、厚度的差异，采用Pearson法分析土壤性状与藓结皮厚度、盖度之间的关系。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和LSD法对不同器官浸提液的抑制作用进行方差分析和多重比较(α=0.05)。使用ArcGIS 10.8、Origin 2023和R 4.1.2软件中的“ggplot2”包进行图形的绘制。所有数据均使用平均值±标准误差表示。

2　结果与分析

2.1　两类灌木地藓结皮的发育差异

如表4、表5所示，研究期内两类灌木地藓结皮盖度存在显著差异(P<0.05)，藓结皮厚度差异不显著(P>0.05)。灌木地藓结皮总盖度、冠层下及冠层间藓结皮盖度均表现为：油蒿>沙柳，且油蒿灌木地藓结皮总盖度、油蒿冠层下及冠层间藓结皮盖度分别为沙柳灌木地相应值的1.6倍、2.9倍和1.1倍。表明两类灌木冠层下的藓结皮盖度差异最大，冠层间差异最小。油蒿灌木地藓结皮总厚度(11.33 mm)、冠层下藓结皮厚度(12.22 mm)均大于沙柳灌木地藓结皮总厚度(10.84 mm)和沙柳冠层下藓结皮厚度(11.11 mm)，油蒿冠层间藓结皮厚度(10.44 mm)则小于沙柳冠层间(10.56 mm)。

2.2　两类灌木地的藓结皮差异的土壤因子分析

2.2.1　*两类灌木地的土壤理化性状差异*　如表6所示，试验期内沙柳灌木地藓结皮下伏土壤养分全氮、全磷、有机质含量均大于油蒿灌木地，但差异不显著(P>0.05)。与沙柳相比，油蒿灌木地藓结皮下伏土壤含水率、黏粒、粉粒含量更高。其中，油蒿冠层间藓结皮下伏土壤含水率分别为3.80%和4.70%，

表2　样地土壤性状背景值

Tab. 2　Background values of soil properties in sample plots

灌木类型	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	有机质/(g·kg^{-1})	含水率/%	pH	黏粒/%	粉粒/%	细砂/%	粗砂/%
油蒿	0.03±0.01a	0.15±0.01a	1.33±0.22a	1.62±0.09a	8.59±0.16a	2.21±038a	5.52±0.77a	34.84±1.13a	58.01±1.61a
沙柳	0.04±0.01a	0.20±0.01a	0.81±0.08a	1.38±0.10a	8.70±0.09a	2.54±0.16a	5.09±0.95a	35.45±0.53a	56..36±1.48a

表3 化感试验因素及水平

Tab. 3 Allelopathic test factors and level

浓度/(g·mL^{-1})	灌木类型					
	油蒿			沙柳		
0.00 0.02 0.20	根	茎	叶	根	茎	叶

表4 两类灌木地藓结皮整体发育状况

Tab. 4 Overall development of moss crusts of two kinds of shrubs

样地类型	结皮厚度/mm	结皮盖度/%
油蒿	11.33±0.41a	88.62±0.74a
沙柳	10.84±0.31a	55.87±1.33b

注:数据为同一指标在同一种灌木类型下的冠层下、冠层间的平均值;同列不同字母表示不同灌木地之间存在显著差异($P < 0.05$)。下同。

表5 两类灌木地冠层下、冠层间藓结皮发育状况

Tab. 5 Development of moss crusts sub-canopy and inter-canopy of two kinds of shrubs

样地类型		结皮厚度/mm	结皮盖度/%
冠层下	油蒿	12.22±0.41a	85.56±0.52a
	沙柳	11.11±0.43a	29.52±3.30b
冠层间	油蒿	10.44±0.41a	91.67±1.02a
	沙柳	10.56±0.85a	82.22±1.11b

显著高于沙柳冠层下的2.70%和冠层间的3.10%($P<0.05$),油蒿冠层间藓结皮下伏土壤黏粒、粉粒含量约为沙柳冠层间下伏土壤黏粒、粉粒含量的2.1倍和1.6倍,两类灌木地冠层下、冠层间藓结皮下伏土壤粗砂含量、pH值差异不显著($P > 0.05$)。沙柳冠层间藓结皮下伏土壤细砂含量为66.10%,显著高于油蒿冠层间的54.60%($P < 0.05$)。

2.2.2 土壤理化因子与藓结皮发育的关系 由Pearson相关性热图可知,土壤因子与藓结皮盖度、厚度的相关性因所处的位置而异。冠层下藓结皮厚度与土壤粉粒含量显著正相关,盖度与土壤含水率显著正相关($P<0.05$)(图2a)。冠层间藓结皮盖度与土壤含水率、黏粒含量显著正相关($P<0.05$),厚度与土壤各因子的相关性不显著($P>0.05$)(图2b)。

2.3 两类灌木不同器官浸提液对藓结皮的化感作用

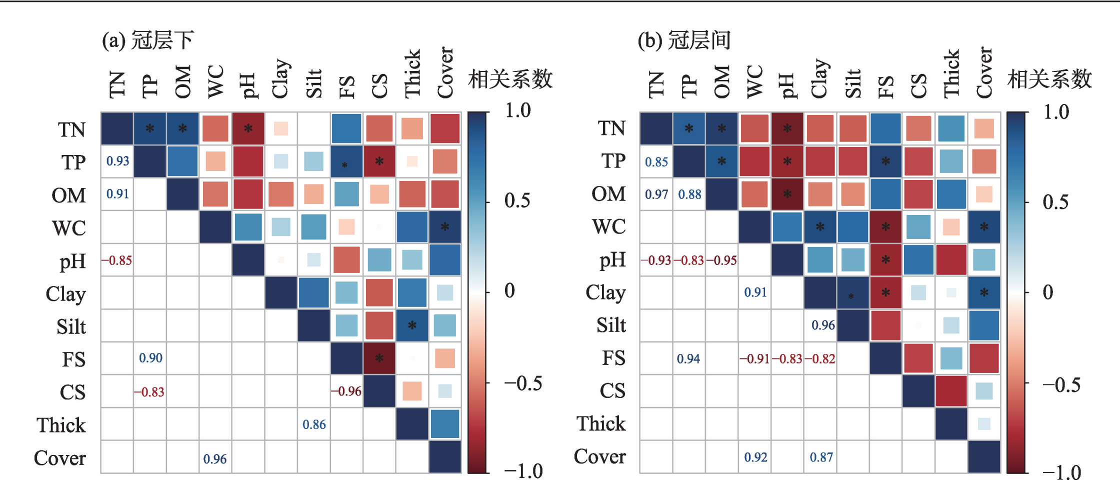
由图3a可知,当浸提液浓度为0.02 g·mL^{-1}时,油蒿根浸提液对株密度的抑制作用最显著($P < 0.05$),其次为油蒿叶,抑制作用最小的为沙柳叶。随着浸提液浓度(0.20 g·mL^{-1})的提高,除沙柳根外,其余处理对株密度的抑制作用均增加,其中,沙柳叶抑制作用显著大于其他处理($P < 0.05$)。与株高度相似,油蒿、沙柳各器官浸提液对藓结皮的株高度均产生了抑制作用,且化感抑制作用随浸提液浓度的提高而增加,当浸提液浓度为0.2 g·mL^{-1}时,对沙柳叶和株高度产生的化感指数(RI)达到最大值,RI值为−0.86(图3b)。与株密度、株高度不同,0.02 g·mL^{-1}的油蒿茎对藓结皮盖度有微弱的促进作用,但促进作用随浸提液浓度(0.20 g·mL^{-1})的提高转变为抑制,即出现低浓度促进高浓度抑制的现象,沙柳根则与之相反(图3c)。

从化感综合效应指数(SE)来看(图3d),油蒿、沙柳不同器官浸提液总体上对藓结皮的发育均起到

表6 两类灌木地冠层下、冠层间土壤理化性状

Tab. 6 Physical and chemical properties of soil in the sub-canopy and inter-canopy of two kinds of shrubs

土壤理化性状	冠层下		冠层间	
	油蒿	沙柳	油蒿	沙柳
全氮/(g·kg^{-1})	0.27±0.03a	0.33±0.03a	0.19±0.02a	0.23±0.03a
全磷/(g·kg^{-1})	0.30±0.03a	0.34±0.02a	0.28±0.02a	0.33±0.02a
有机质/(g·kg^{-1})	5.67±0.43a	7.13±0.92a	4.05±0.37a	4.79±0.57a
含水率/%	3.80±0.17a	2.70±0.06b	4.70±0.09a	3.10±0.12b
pH	8.54±0.04a	8.43±0.01a	8.72±0.03a	8.61±0.07a
黏粒/%	3.80±0.32a	3.60±0.28a	6.40±0.40a	3.00±0.43b
粉粒/%	10.50±0.87a	9.40±0.62a	13.60±1.42a	8.40±0.85b
细砂/%	66.90±3.52a	69.20±1.30a	54.60±2.63b	66.10±2.14a
粗砂/%	19.00±4.68a	17.70±0.58a	25.40±3.41a	22.40±2.09a



注:TN为全氮; TP为全磷; OM为有机质; WC为含水量; pH为酸碱度; Clay为黏粒; Silt为粉粒; FS为细砂; CS为粗砂; Thick为结皮厚度; Cover为结皮盖度。*表示在$P<0.05$水平上差异显著。

图2 土壤理化性状与藓结皮发育特征的相关性热图

Fig. 2 Heat map of correlation between soil physical and chemical properties and developmental characteristics of moss crusts

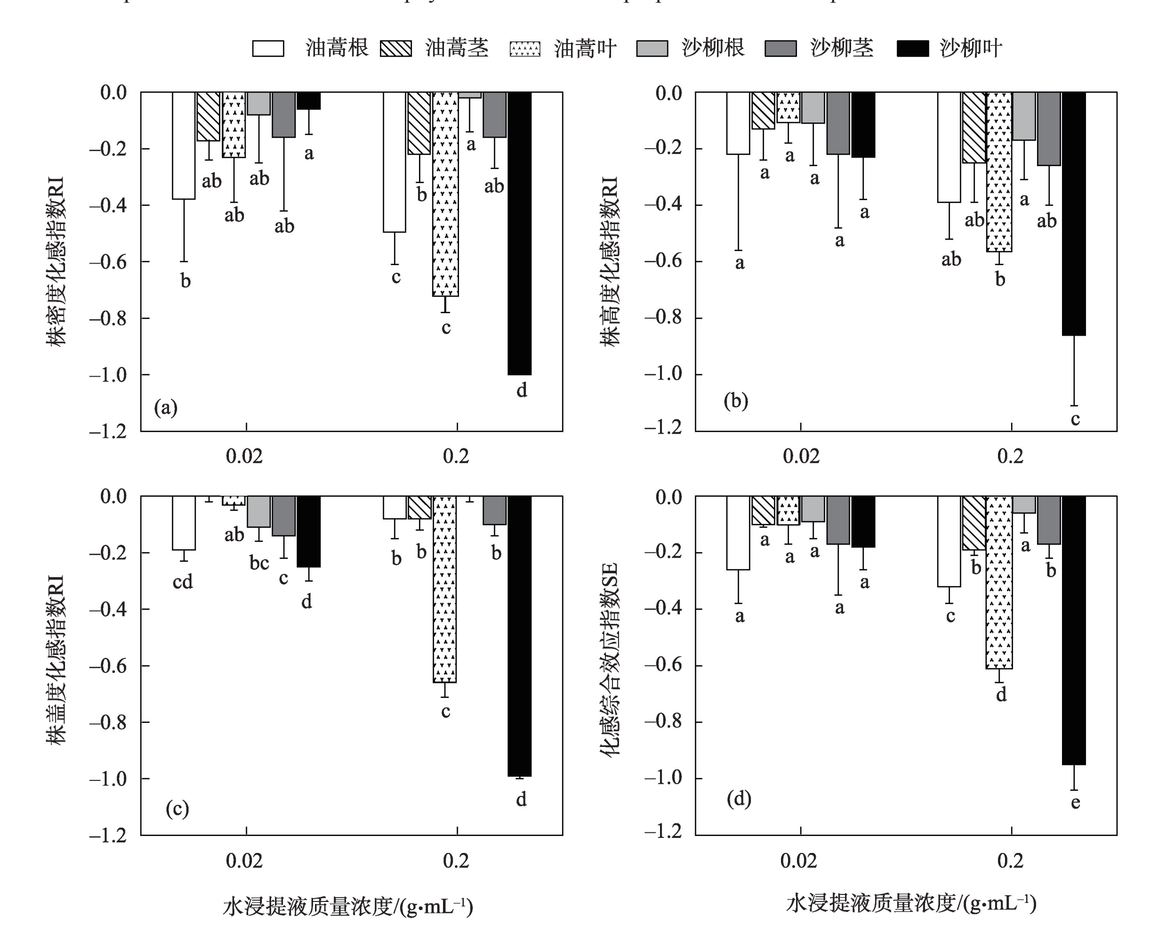


图3 两类灌木不同器官浸提液对藓结皮的化感指数(RI)和化感综合效应(SE)

Fig. 3 Allelopathic index (RI) and allelopathic comprehensive effect (SE) of extracts from different organs of two kinds of shrubs on moss crusts

了抑制作用(SE均为负值),抑制效果因灌木及器官种类、浸提液浓度而异。当浸提液浓度为0.02 g·mL^{-1}时,油蒿、沙柳不同器官水浸提液对藓结皮的抑制作用由大到小为:油蒿根>沙柳叶>沙柳茎>油蒿叶>油蒿茎>沙柳根。当浸提液浓度为0.2 g·mL^{-1}时,抑制作用由大到小为:沙柳叶>油蒿叶>油蒿根>

油蒿茎>沙柳茎>沙柳根，其中，0.2 g·mL^{-1}浓度沙柳叶浸提液对藓结皮发育的抑制作用最大，SE值为−0.95。

3 讨论

3.1 油蒿通过改善土壤水分及粒径组成进而促进藓结皮发育

多项研究表明，土壤含水率、黏粒及粉粒含量较高的土壤更有利于生物结皮的定植与发育[25-26]。本研究中，灌木冠层下、冠层间藓结皮盖度均与土壤含水率显著正相关($P < 0.05$)；冠层下藓结皮厚度与粉粒显著正相关，冠层间藓结皮盖度与黏粒显著正相关(图2)($P < 0.05$)，这说明藓结皮在土壤含水率、黏粒、粉粒较高的土壤基质中发育较好，这与前人的研究结果一致[25-26]。已有研究表明，不同灌木覆盖下藓结皮下伏土壤含水率存在很大差异[27]。本研究中，油蒿冠层下、冠层间藓结皮下层土壤含水率均高于沙柳(表6)。表明油蒿对藓结皮下伏土壤含水率的提高效果优于沙柳。这是因为相较于植株外形高大的沙柳，油蒿枝叶密集、植株低矮，可减少风对浅层土壤水分的蒸散，从而有利于地表土壤水分的保持[28-29]。因此，在土壤含水率高的油蒿灌木地藓结皮盖度最高。党晓宏等[20]认为，沙柳对藓结皮下方土壤的细化作用优于油蒿。本研究则发现，油蒿灌木冠层下、冠层间藓结皮下伏土壤黏粒与粉粒含量均高于沙柳，这与其结果相悖。这可能是由于本研究中沙柳灌木地凋落物多于油蒿，凋落物的存在将灌木捕获的细小颗粒拦截在凋落物上方，阻碍了黏粒、粉粒向下运动。油蒿灌木地较高的黏粒、粉粒含量有助于提高土壤表面稳定性和持水能力(图2)，促进藓结皮在油蒿地的定植与发育[30]。此外，凋落物在分解的过程中会释放化感物质和养分[31]，造成沙柳冠层下、冠层间藓结皮下伏土壤养分含量均高于油蒿(表6)。以往的研究表明，土壤全氮、全磷、有机质与生物结皮的盖度由显著的正相关关系[32]。但由于本研究中沙柳灌木地土壤含水率较低，干燥的土壤环境并不利于苔藓的定植，缺水产生的消极作用可能完全掩盖了土壤养分对藓结皮发育的积极作用。因此，本研究中藓结皮盖度、厚度与全氮、全磷、有机质含量无显著相关性($P > 0.05$)。

3.2 油蒿、沙柳不同器官水浸提液对藓结皮发育的化感抑制作用

植物化感作用又称植物他感作用，是指植物通过释放化学物质到环境中而产生的对其他植物(含微生物)直接或间接的有害作用[33]。研究发现，油蒿、沙柳不同器官浸提液均对藓结皮发育产生了抑制作用(图3)，即使浸提液浓度相同时，不同器官之间的化感综合效应指数(SE)仍然存在差异(图3d)，这可能与植物器官中所含化感物质的种类与含量有关[34]。当浸提液浓度为低浓度(0.02 g·mL^{-1})时，各灌木器官对藓结皮发育的化感抑制作用由大到小为：油蒿根>沙柳叶>沙柳茎>油蒿叶>油蒿茎>沙柳根(图3d)，说明低浓度(0.02 g·mL^{-1})时藓结皮的发育受油蒿根的化感抑制作用最大。但自然条件下，灌木茎、叶的化感物质在雨雾淋溶的作用下直接对周围植物的生长发育产生影响，而根系分泌则通过影响地下种子库以及根系活动来影响植物生长，因此地表藓结皮受灌木根系分泌的化感物质影响较小[35]。随着浸提液浓度(0.2 g·mL^{-1})的增加，油蒿、沙柳叶对藓结皮的抑制作用显著增强，SE值分别为−0.95和 −0.65(图3d)。由于油蒿灌木地凋落物积累少，化感抑制作用较轻。沙柳枝条细长密集，凋落物产量高[27]，沙柳灌木地藓结皮受到的化感抑制作用强，从而导致沙柳灌木地鲜有藓结皮生长。可见，化感作用也是造成两类灌木地藓结皮发育差异的关键原因。

4 结论

油蒿灌木地的藓结皮总盖度以及冠层下、冠层间的盖度均显著高于沙柳灌木地，前者分别为后者的1.6倍、2.9倍和1.1倍。土壤含水率、黏粒、粉粒含量是造成两类灌木地藓结皮发育差异的关键土壤因子，油蒿通过改善土壤水分及黏粒、粉粒的含量促进了藓结皮的发育。同时，高浓度(0.2 g·mL^{-1})沙柳叶水浸提液对藓结皮发育的抑制作用最显著。可以推测，油蒿灌木地较高的土壤含水率、黏粒、粉粒含量，以及沙柳叶对沙柳灌木地藓结皮显著的化感抑制作用，共同导致了油蒿灌木地藓结皮发育状况优于沙柳灌木地。可见，开展旱区荒漠的生态建设时，需充分考虑植被类型对生物发育的影响。油蒿−藓结皮立体防护配置模式，在毛乌素工程化防

沙固沙荒漠治理方面具有广阔前景,有望受到科学界的更多关注。

参考文献(References):

[1] Kidron G J. The dual effect of sand-covered biocrusts on annual plants: Increasing cover but reducing individual plant biomass and fecundity[J]. Catena, 2019, 182. doi: 10.1016/j.catena.2019.10 4120.

[2] Rodriguez-Caballero E, Belnap J, Buedel B, et al. Dryland photo-autotrophic soil surface communities endangered by global change [J]. Nature Geoscience, 2018, 11(3): 185–189.

[3] Strauss S L, Day T A, Garcia-Pichel F. Nitrogen cycling in desert biological soil crusts across biogeographic regions in the Southwestern United States[J]. Biogeochemistry, 2012, 108(1–3): 171–182.

[4] Elbert W, Weber B, Burrows S, et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(7): 459–462.

[5] Bu C, Zhao Y, Hill R L, et al. Wind erosion prevention characteristics and key influencing factors of bryophytic soil crusts[J]. Plant and Soil, 2015, 397(1–2): 163–174.

[6] Chaudhary V B, Bowker M A, O'Dell T E, et al. Untangling the biological contributions to soil stability in semiarid shrublands[J]. Ecological Applications, 2009, 19(1): 110–122.

[7] Chamizo S, Rodriguez-Caballero E, Roman J R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall[J]. Catena, 2017, 148: 117–125.

[8] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, et al. Interactive effects of three ecosystem engineers on infiltration in a semi-arid Mediterranean grassland[J]. Ecosystems, 2010, 13(4): 499–510.

[9] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems[J]. Ecosystems, 2012, 15(1): 148–161.

[10] 杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题[J]. 生态学报, 2000, 21(3): 474–480. [Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Zhao Yunjie. Microbiotic soil crust-a research forefront in desertification- prone areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 21(3): 474–480.]

[11] Concostrina-Zubiri L, Pescador D S, Martinez I, et al. Climate and small scale factors determine functional diversity shifts of biological soil crusts in Iberian drylands[J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(7): 1757–1770.

[12] Garibotti I A, Gonzalez Polo M. Divergence among biological soil crust communities developing under different environmental conditions[J]. Journal of Vegetation Science, 2021, 32(1), doi: 10.1111/jvs.12987.

[13] Zaady E, Groffman P, Shachak M. Nitrogen fixation in macro- and microphytic patches in the Negev desert[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(4): 449–454.

[14] Zhou X J, Tan K, Li S X, et al. Induced biological soil crusts and soil properties varied between slope aspect, slope gradient and plant canopy in the Hobq desert of China[J]. Catena, 2020, 190: 104559. doi: 10.1016/j.catena.2020.104559.

[15] Briggs A, Morgan J W. Morphological diversity and abundance of biological soil crusts differ in relation to landscape setting and vegetation type[J]. Australian Journal of Botany, 2008, 56(3): 246–253.

[16] 吴楠, 张元明, 潘惠霞. 古尔班通古特沙漠地衣结皮对放牧踩踏干扰的小尺度响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1032–1038. [Wu Nan, Zhang Yuanming, Pan Huixia. Response of fungi-algae symbiotic lichen crusts to grazed livestock disturbance in the Gurbantunggut Desert[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 1032–1038.]

[17] 张军红, 吴波, 贾子毅, 等. 毛乌素沙地油蒿植冠下生物结皮分布特征及其影响因素研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 866–871. [Zhang Junhong, Wu Bo, Jia Ziyi, et al. Pattern of biological soil crust and its driving factors under *Artemisia ordosica* in Mu Us Sandy Land[J]. Forestry Research, 2010, 23(6): 866–871.]

[18] 吴永胜, 尹瑞平, 田秀民, 等. 毛乌素沙地南缘人工植被区生物结皮发育特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 339–344. [Wu Yongsheng, Yin Ruiping, Tian Xiumin, et al. Development characteristics of biological crusts under artificial vegetation in Southern Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 339–344.]

[19] 岳艳鹏, 孙迎涛, 庞营军, 等. 毛乌素沙地沙丘活化过程中油蒿(*Artemisia ordosica*)根系特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 177–184. [Yue Yanpeng, Sun Yingtao, Pang Yingjun, et al. Root characteristics of *Artemisia ordosica* in the process of sand dunes activation in Mu Us Sandland[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3): 177–184.]

[20] 党晓宏, 李小乐, 蒙仲举, 等. 毛乌素沙地不同植被生境下藓类结皮对土壤物理性质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 158–163. [Dang Xiaohong, Li Xiaole, Meng Zhongju, et al. Effects of moss crusts on soil physical properties for different vegetation habitats in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 158–163.]

[21] 杨永胜, 冯伟, 袁方, 等. 快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因子[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 289–294. [Yang Yongsheng, Feng Wei, Yuan Fang, et al. Key Influential factors of rapid cultivation of moss crusts on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 289–294.]

[22] Bruce Williamson G, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology, 1988, 14(1): 181–187.

[23] 沈慧敏, 郭鸿儒, 黄高宝. 不同植物对小麦、黄瓜和萝卜幼苗化感作用潜力的初步评价[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 740–743. [Shen Huimin, Guo Hongru, Huang Gaobao. Allelopathy of different plants on wheat, cucumber and radish seedlings[J]. Chi-

nese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 740–743.]

[24] 舒霞, 吴玉程, 程继贵, 等. Mastersizer 2000激光粒度分析仪及其应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(2): 164–167. [Shu Xia, Wu Yucheng, Cheng Jigui, et al. Mastersizer 2000 laser particle size analyzer and its applications[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2007, 30(2): 164–167.]

[25] Chock T, Antoninka A J, Faist A M, et al. Responses of biological soil crusts to rehabilitation strategies[J]. Journal of Arid Environments, 2019, 163: 77–85.

[26] Li X R, Song G, Hui R, et al. Precipitation and topsoil attributes determine the species diversity and distribution patterns of crustal communities in desert ecosystems[J]. Plant and Soil, 2017, 420(1–2): 163–175.

[27] 赵哈林, 郭轶瑞, 周瑞莲, 等. 植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1657–1663. [Zhao Halin, Guo Yirui, Zhou Ruilian, et al. Effects of vegetation cover on physical and chemical properties of bio-crust and under-layer soil in Horqin Sand Land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1657–1663.]

[28] 罗雅曦, 刘任涛. 宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 60–67. [Luo Yaxi, Liu Rentao. Evaluation on soil quality of different sand-binding shrub plantations within straw checkerboard in the desertified area of Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 60–67.]

[29] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东沙地不同植被恢复措施下土壤水分变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 76–86. [Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Variation of soil moisture content in vegetation restoration area of sandy land at east shore of Qinghai Lake [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 76–86.]

[30] 张继义, 赵哈林. 退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤-植被系统稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1395–1401. [Zhang Jiyi, Zhao Halin. Changes in soil particles fraction and their effects on stability of soil-vegetation system in restoration processes of degraded sandy grassland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1395–1401.]

[31] 郭鑫, 卢立娜, 贺晓辉, 等. 毛乌素沙地人工固沙灌木林凋落物分解及改良土壤的研究[J]. 林业资源管理, 2014, 10(5): 74–78. [Guo Xin, Lu Lina, He Xiaohui, et al. Study on litter decomposition and soil improvement in artificial shrub forest in Maowusu Sandy Land[J]. Forest Resources Management, 2014, 10(5): 74–78.]

[32] Zhao Y, Xu W W, Wang N. Effects of covering sand with different soil substrates on the formation and development of artificial biocrusts in a natural desert environment[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105081. doi: 10.1016/j.still.2021.105081.

[33] Rice E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press, 1984: 320–324.

[34] 王方琳, 尉秋实, 柴成武, 等. 沙蒿(*Artemisia desertorum*)浸提液对自身种子萌发与幼苗生长的化感作用[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 21–28. [Wang Fanglin, Yu Qiushi, Chai Chengwu, et al. Allelopathic effects of *Artemisia desertorum* extracts on its own seed germination and seedling growth[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 21–28.]

[35] 邓文红. 黑沙蒿群落植物演替过程中的化感作用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. [Deng Wenhong. Allelopathy of *Artemisia ordosica* Community in the Process of Plant Succession[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.]

Differences in moss crust development between *Artemisia ordosica* and *Salix pasmmophia* shrubs

MO Qiuxia[1], SONG Wei[2], BU Chongfeng[3,4], WANG Chun[3],
WANG Heming[5], LI Yahong[6]

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Landscape and Engineering Branch of Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 5. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 6. Office of Meixian County Party Committee, Baoji 722399, Shaanxi, China)

Abstract: The soil properties and moss crust development indices in typical *Artemisia ordosica* and *Salix pasmmophia* shrub land plots in the sandy area of Mu Us Sandland have previously been analyzed in combination with allelopathic tests of the extracts from the different shrub organs. The results showed that moss crust development in *A. ordosica* shrub land was better than that in *S. pasmmophia* shrub land, but the reason is unclear, and elucidating it is the aim of this investigation. A significant difference in the moss crust coverage between the two kinds of shrubs ($P < 0.05$) was identified. The total moss crust coverage and sub-canopy and inter-canopy crust coverage were as follows: *A. ordosica* > *S. pasmmophia*, and the total moss crust coverage and subcanopy and intercanopy crust coverage in the *A. ordosica* shrub land were 1.6, 2.9, and 1.1 times higher than those in the sand *S. pasmmophia* shrub land, respectively. Furthermore, there was no significant difference in moss crust thickness between the two kinds of shrubs ($P > 0.05$). Pearson correlation analysis showed that the moss crust coverage in the sub-canopy was significantly positively correlated with the soil water content, moss crust thickness in the sub-canopy was significantly positively correlated with silt content, and inter-canopy moss crust coverage was significantly positively correlated with soil water and clay content ($P < 0.05$). The higher soil water, clay, and silt contents in the *A. ordosica* shrub land promoted the development of moss crusts. The aqueous extracts from the roots, stems, and leaves of the *A. ordosica* and *S. pasmmophia* inhibited the development of moss crusts; that is, the allelopathic synthesis effect (SE) was negative. Specifically, the allelopathic inhibitory effect of the 0.2 $g \cdot mL^{-1}$ aqueous extract of the *S. pasmmophia* leaves was the strongest, with an SE of −0.95. The inhibitory effect was significantly higher than that of the *A. ordosica* leaves (SE = −0.65). It can be inferred from the results that the higher soil water, clay, and silt contents in the *A. ordosica* shrub land and the significant allelopathic inhibition of the *S. pasmmophia* leaves on the moss crusts led to the improved development of moss crusts in *A. ordosica* shrub land when compared with *S. pasmmophia* shrub land.

Keywords: *Artemisia ordosica*; *Salix pasmmophia*; moss crusts; allelopathy; comparative research; Mu Us Sandland